

Hydrodynamique de l'accumulation des dépôts de paraffine dans une géométrie Couette cylindrique.

Amine Benallal¹, Philippe Maurel¹ & Jean François Agassant²

Organisation(s): ¹ IFP

Laboratoire(s): ² Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)

Adresse(s) postale(s): ¹ IFP-Lyon BP3 Vernaison 69390, France.

² École des Mines de Paris CEMEF- UMR CNRS 7635

BP207, 06904 Sophia Antipolis, France

email de l'auteur à contacter: amine.benallal@ifp.fr

Résumé :

Les principaux modèles utilisés pour prédire la formation d'un dépôt de paraffine surestiment l'épaisseur de celui-ci et exigent des ajustements de paramètres au cas par cas pour réconcilier les calculs avec les données expérimentales.

Nous proposons, dans cette étude, une nouvelle approche pour la formation de dépôt. Le brut paraffinique est considéré comme un fluide viscoplastique. La loi rhéologique utilisée est une extension de la loi de Bingham dont la consistance et la contrainte seuil dépendent de la température et de la quantité de cristaux. Des simulations numériques d'écoulement dans une géométrie Couette cylindrique ont été réalisées pour montrer le bien-fondé de cette approche.

Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle joué par le mécanisme d'enrichissement et l'influence de la quantité de cristaux sur la structure de l'écoulement, spécialement en termes de zones cisailées/non cisailées. Une couche statique apparaît près de la paroi du cylindre refroidi, représentant le dépôt.

Abstract :

The models used to predict a wax deposit overestimate it and they need some parameters fitting to match computational data to experimental ones

In this study, a new approach is proposed. A waxy crude oil is considered as a viscoplastic fluid. An extension of classical Bingham model in which both viscosity and yield stress depend on temperature and wax crystal is used. Numerical simulations of the flow in a Couette geometry were carried out to show that this approach is relevant. The numerical results highlight the influence of wax crystals content on the flow pattern, especially in terms of yielded /unyielded regions. A static layer region appears near the colder wall, representing the deposit.

Mots-clefs : Dépôt de paraffine, Mécanisme d'enrichissement, Comportement viscoplastique.

1 Introduction

Le transport d'un pétrole paraffinique en pipeline engendre, dans certaines circonstances notamment lors d'un refroidissement par le milieu extérieur, un dépôt à la paroi. En effet, au cours du refroidissement et en dessous d'une température dite de cristallisation commençante (Θ_{cc}), les normales paraffines contenues dans le brut cristallisent et migrent en direction de la paroi, formant le dépôt. La conséquence directe est la réduction de la section d'écoulement et donc le ralentissement de la production voire son arrêt. Les phénomènes gouvernant cette problématique ont été étudiés maintes fois dans la littérature. La majorité des chercheurs, Burger et al (1981); Maurel et al (2000)); s'accordent pour dire que la diffusion moléculaire est le principal mécanisme à l'origine de la formation du dépôt. Ce mécanisme résulte d'une diminution de la solubilité des paraffines en proche paroi, due aux températures "froides" inférieures à Θ_{cc} . Ceci entraîne une solidification de ces paraffines à la paroi et par là même une diminution de la quantité de paraffines dissoutes dans le fluide. Au voisinage de la paroi, un

gradient de concentration radial va exister produisant une migration de paraffines du cœur du fluide vers la paroi. Cette approche pourrait laisser penser que le dépôt n'est constitué que de paraffines cristallisées qui s'accumulent à la paroi de la conduite. Or il n'en est rien car le dépôt est constitué d'un mélange de paraffines et d'huile piégée. De plus, les effets de l'écoulement sur le dépôt ne sont pas pris en compte par cette modélisation. Pour retrouver les épaisseurs de dépôt obtenu expérimentalement, les outils prédictifs basés sur ce modèle seul surestiment "artificiellement" l'effet de la migration des paraffines. De surcroît, ces outils n'expliquent pas le mécanisme d'accrochage de ce dépôt à la paroi.

Nous proposons dans cet article, une nouvelle approche phénoménologique de la construction du dépôt: Le brut, extrait avec une température supérieure à Θ_{cc} , s'écoule dans un environnement froid. Il subit un refroidissement pariétal progressif. Les premiers cristaux de paraffine apparaissent près de la paroi. Le mécanisme d'enrichissement en paraffine se met en place en proche paroi modifiant progressivement le comportement rhéologique du brut. La couche fluide près de la paroi se transforme peu à peu en gel, ralentit progressivement sous l'effet du changement de rhéologie et finalement s'arrête en formant le dépôt de paraffines.

2 Mise en équation du problème :

Le déplacement de la paraffine liquide à l'intérieur du brut dans un pipeline se fait à la fois par convection et par diffusion radiale. Dans cet article, nous mettons uniquement en évidence le rôle du transport de la paraffine liquide par diffusion radiale. Ainsi, dans un souci de simplification, nous effectuons des simulations dans une géométrie de Couette cylindrique. Cette géométrie permet de s'affranchir des termes convectifs en faisant quelques hypothèses (Cf. ci-dessous). Bien que les calculs dans un Couette cylindrique soient différents de la situation du pipeline où le brut est constamment renouvelé en entrée avec une concentration de paraffines constante, le principe du mécanisme de l'enrichissement reste le même.

Le système d'équations à résoudre pour l'écoulement d'un fluide viscoplastique thermodépendant avec un mécanisme d'enrichissement dans une géométrie Couette cylindrique est le suivant :

Conservation de la masse et de la quantité de mouvement :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} P = \vec{\nabla} \cdot \underline{\underline{\tau}} \end{cases} \quad (2.1)$$

ρ , \vec{U} , P et $\underline{\underline{\tau}}$ sont respectivement la masse volumique, le vecteur vitesse, la pression et le tenseur déviateur des contraintes.

La loi viscoplastique de type Bingham a été retenue pour modéliser le comportement rhéologique du brut. La consistance μ et la contrainte seuil τ_0 dépendent de la température et de la quantité de paraffine cristallisée C_s .

$$\begin{cases} \underline{\underline{\tau}} = 2\mu(\Theta, C_s) \cdot \underline{\underline{D}} + \frac{D}{\|D\|} \cdot \tau_0(\Theta, C_s) & \text{si } \|\tau\| > \tau_0(\Theta, C_s) \\ D = 0 & \text{si } \|\tau\| \leq \tau_0(\Theta, C_s) \end{cases} \quad \text{si } \Theta \leq \Theta_{cc} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} C_s &= f(\Theta, C_l) \\ \tau_0(\Theta, C_s) &= 0 & \text{si } \Theta > \Theta_{cc} \end{aligned} \quad (2.3)$$

où \underline{D} est le tenseur des déformations, Θ_{cc} est la température de cristallisation commençante $\|\cdot\|$ la norme euclidienne et f est un modèle thermodynamique d'équilibre de phase liquide/solide.

$$\text{La conservation de l'énergie se traduit par : } \rho C_f \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda_f \nabla^2 \Theta \quad (2.4)$$

Θ , C_f et λ_f sont respectivement la température, la capacité calorifique et la conductivité thermique du fluide supposée constante. Les termes de dissipation visqueuse sont négligés.

La conservation de la paraffine liquide dans le fluide s'écrit :

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D_m \vec{\nabla} C_l) - Pu \text{ avec } Pu = \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (2.5)$$

où C_l et C_s sont respectivement la concentration de paraffine dissoute et cristallisée dans le fluide, D_m le coefficient de diffusion des paraffines fondues supposé constant, et Pu le terme puits engendré par le changement de phase de la paraffine.

La géométrie du problème est un Couette cylindrique qu'on notera C.C (Cf.

FIG. 1). Le problème est monodimensionnel car l'écoulement est axisymétrique, axialement homogène et les effets de bord sont négligeables (cylindres infiniment longs).

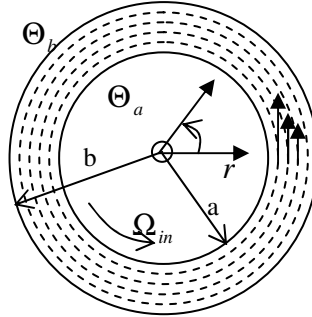


FIG. 1: Géométrie de Couette cylindrique et conditions aux limites.

Initialement, le fluide est à la même température que la paroi du cylindre extérieur $\Theta_b > \Theta_{cc}$. La paroi du cylindre intérieur est à la température $\Theta_a \leq \Theta_{cc}$. Le cylindre intérieur tourne à vitesse angulaire Ω_{in} . Le cylindre extérieur est immobile. La condition de non glissement est imposée aux parois des deux cylindres. Le fluide contient une quantité de paraffine finie, C_0 . Les parois du C.C sont imperméables d'où : $\frac{\partial C_l}{\partial r}(a, t) = \frac{\partial C_l}{\partial r}(b, t) = 0$.

3 Résolution numérique du système d'équations:

Les inconnues du problème (2.1) (2.4) (2.5) sont les vitesses et la pression; or la discontinuité de la loi de comportement est en contrainte, et par conséquent nous sommes incapables d'évaluer la distribution des contraintes dans les zones non cisillées. Une méthode de résolution basée sur le lagrangien augmenté permet d'inclure la discontinuité de cette loi dans la résolution via des multiplicateurs de Lagrange. Ainsi les zones non-cisillées sont caractérisées par un tenseur de taux de déformation parfaitement nul et peuvent être identifiées de manière exacte (Cf. Vinay et al (2005)).

Le domaine de calcul est discrétisé par la méthode des volumes finis. Le problème vitesse-pression est résolu par un algorithme d'Uzawa associé à la méthode du Lagrangien augmenté. La discrétisation temporelle de l'équation de Fick avec un terme puits (2.3) se fait par la

méthode de Marchuk-Yanenko (1975). Cette méthode permet de décomposer un problème donné en plusieurs sous problèmes afin de découpler les difficultés. Le terme puits de cette équation est égal à la vitesse cinétique d'apparition de la quantité de paraffine solide, $\frac{\partial C_s}{\partial t}$, qui est généralement proportionnelle à C_s donc $Pu(C_l^{n+1}) = k' C_s^{n+1}(\Theta, C_l^{n+1})$. La détermination de la constante k' et de la quantité $C_s(\Theta, C_l)$ nécessite une étude cinétique et thermodynamique des paraffines. Nous prendrons, pour nos calculs, une loi arbitraire respectant certaines conditions pour s'assurer du bien fondé de notre modélisation. La résolution du problème thermique (2.2), de la conservation de la paraffine C_l (2.3) et du problème vitesse-pression se fait de manière découplée. Le régime stationnaire est atteint lorsque la variation des inconnues d'un pas de temps à l'autre est petite.

4 Écoulement d'un fluide de Bingham dans une géométrie Couette cylindrique avec un mécanisme d'enrichissement:

Nous simulons l'écoulement d'un fluide de Bingham avec un mécanisme d'enrichissement respectant les conditions aux limites ci-dessus. La contrainte seuil varie arbitrairement en fonction de la quantité de paraffine cristallisée comme suit: $\tau_0(\Theta, C_s) = B.C_s^2$. Nous posons la viscosité égale à : $\mu(\Theta) = 0.01 \cdot \exp\left(\frac{27.4}{8.3} \left(\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{313}\right)\right)$, on néglige la dépendance de la viscosité en fonction de la quantité de paraffine solide, C_s . Nous construisons arbitrairement un modèle thermodynamique permettant de déterminer la quantité de paraffine cristallisée si la température est inférieure à Θ_{cc} : $C_s = A.C_l(\Theta^{-2} - \Theta_{cc}^{-2})$, où A est une constante. Les valeurs numériques sont récapitulées dans le tableau ci dessous.

Θ_a (K)	Θ_b (K)	C_l (J/K/kg)	λ_f (W/m/K)	Ω_{in} (rad/s)	ρ (kg/m ³)	D_m	a (m)	b (m)
298	313	2000	0,2	10	872,3	10^{-5}	0,025	0,1

Tableau 1: Valeurs numériques des paramètres de calcul.

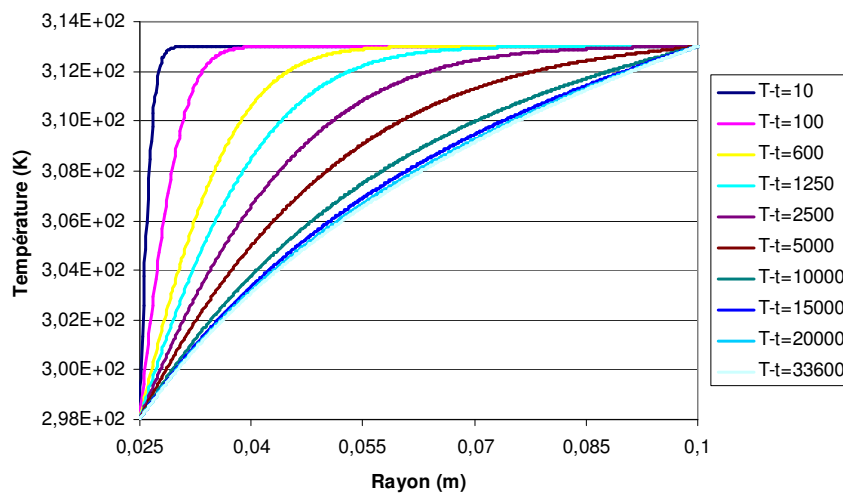


FIG. 2: Évolution de la température dans l'entrefer.

Nous présentons sur la Fig. 2 l'évolution au cours du temps de la température dans l'entrefer. Le régime permanent est atteint au bout de 9 heures et 30 minutes.

Il y a appauvrissement en paraffines liquides près de la paroi du cylindre intérieur. Ceci engendre une migration de la paraffine liquide de la paroi du cylindre extérieur (cylindre "chaud") vers la paroi du cylindre intérieur (cylindre "froid"). Le mécanisme d'enrichissement est donc mis en route. L'évolution au cours du temps de la paraffine solide est présentée sur la FIG. 3. Nous notons qu'au bout de trois heures la totalité de la paraffine liquide, présente initialement dans le brut, est transformée en paraffine solide près de la paroi.

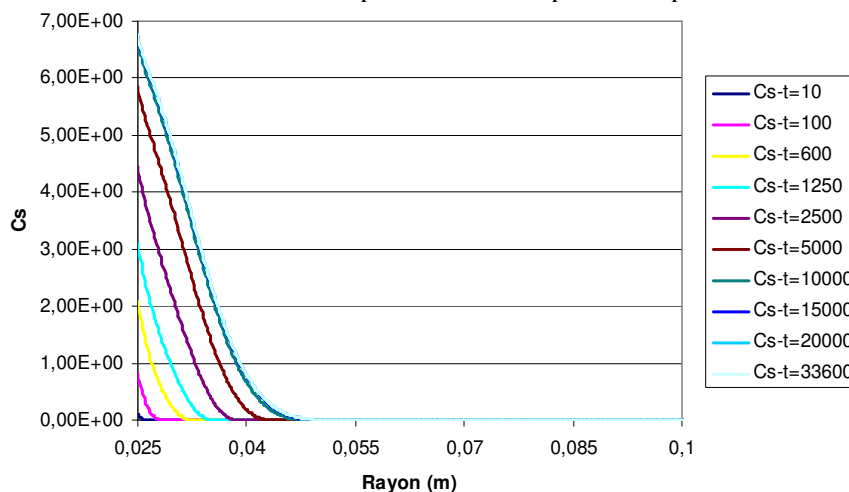


FIG. 3: Évolution au cours du temps de la paraffine solide dans l'entrefer.

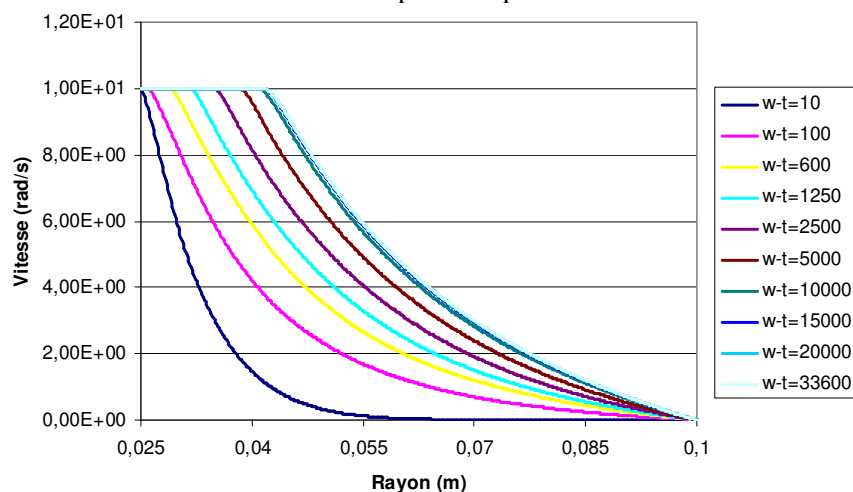


FIG. 4: Évolution de la vitesse angulaire dans l'entrefer.

L'évolution radiale au cours du temps de la vitesse de rotation est présentée sur la Fig. 4. Nous constatons qu'il y a une partie du fluide qui tourne à la même vitesse que le cylindre intérieur. Cette partie se comporte comme un "solide" que l'on peut assimiler au dépôt.

La Fig. 5 représente l'évolution temporelle de l'épaisseur du dépôt et de l'isotherme Θ_{cc} dans l'entrefer. Nous constatons que ce dépôt grossit et atteint une épaisseur constante au bout de 3 heures environ. Cela correspond au temps qu'il a fallu pour que la paraffine liquide soit totalement transformée en paraffine solide. Notons que cette épaisseur est inférieure à celle que l'on obtiendra en regardant l'évolution de l'isotherme Θ_{cc} . La contrainte de cisaillement calculée à la paroi du cylindre intérieur en utilisant la relation pour un fluide newtonien avec

une viscosité constante donne: $\tau_i = 2.6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$. Cette valeur est relativement faible. Par conséquent on constate que, dès qu'il y a apparition des premiers cristaux et donc d'une contrainte seuil, le dépôt de paraffine se forme.

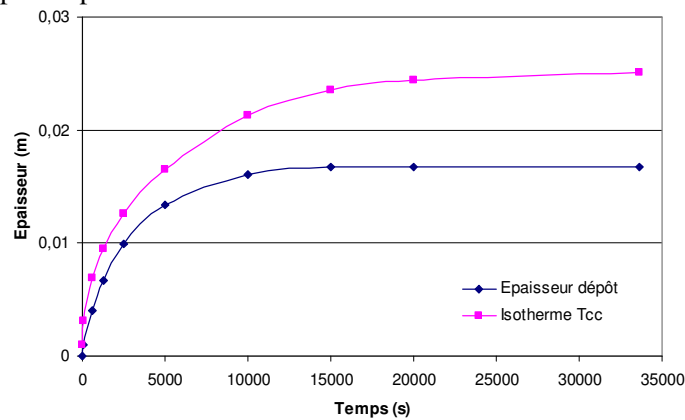


FIG. 5: Évolution temporelle de l'épaisseur du dépôt de paraffine et de l'isotherme Θ_{cc} .

5 Conclusions.

Un code monodimensionnel pour un écoulement de fluide viscoplastique thermodépendant et dépendant de la quantité de paraffine cristallisée dans une géométrie de C.C a été développé afin de mettre en évidence la création d'un dépôt de paraffine à la paroi froide.

Nous avons utilisé la technique du lagrangien augmenté pour nous affranchir de la discontinuité en contrainte du modèle viscoplastique. Ainsi les zones non cisailées sont déterminées de manière exacte. De plus l'équation de diffusion moléculaire a été implémentée par la méthode de Marshuk Yanenko. Cette méthode permet de découpler les difficultés de l'équation de Fick avec un terme puits.

Les résultats obtenus sont encourageants. En effet nous avons pu constater que le mécanisme d'enrichissement fonctionne bien : il diminue la concentration de la paraffine liquide dans le brut et augmente la quantité de paraffine solide près de la paroi modifiant localement le comportement rhéologique du fluide. De plus nous avons constaté l'apparition d'un dépôt de paraffine qui croît au cours de temps jusqu'à atteindre une épaisseur constante. Cette épaisseur est atteinte lorsque la paraffine liquide est complètement cristallisée.

Références:

- BURGER E.D., PERKINS T.K., STRIEGLER J.H. June 1981, Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline, Journal of Petroleum Technology, 1075-1086.
- MAUREL Ph., GATEAU P., BRUCY F., BARBEY A., BONNET N., PEURIERE E. octobre 2000, Bruts paraffiniques, Maîtrise des dépôts, Tests en boucle, rapport interne IFP.
- MARCHUK. G.I, Methods of numerical mathematics. Springer, 1975.
- VINAY G., ANTHONY W., AGASSANT J;F. septembre 2005, Simulation numérique d'un écoulement de fluide viscoplastique thermodépendant: application au transport des bruts paraffiniques, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique à Troyes, France.